

Моделювання транспортно-виробничого комплексу при вирощуванні сільськогосподарських культур з урахуванням авіаційної складової

С. В. Пронь, О. О. Соловйова, І. М. Герасименко, І. В. Борець

Проведеними дослідженнями транспортно-технологічного процесу вирощування сільськогосподарських культур встановлено, що він являє собою складну динамічну систему. Доведено, що складність цієї системи полягає у наявності великої кількості різнорідних підсистем, у тому числі й транспортної, яка є важливою складовою для забезпечення вирощування сільськогосподарських культур. Завдяки системному підходу до дослідження транспортного забезпечення технологічного процесу вирощування сільськогосподарських культур стало можливим виявити функціональні особливості застосування наземних та авіаційних транспортних засобів. Встановлено властивості кожного етапу технологічного процесу вирощування та участі у ньому певного виду транспортних засобів.

Розроблено схему транспортного забезпечення технологічного процесу вирощування сільськогосподарських культур та визначено вплив авіаційної складової на певних його етапах в умовах впровадження ресурсозберігаючої No-Till технології.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що застосування авіаційного транспорту сприяє впровадженню ресурсозберігаючої No-till технології за рахунок мінімізації механічного обробітку посівних площ, що зменшує антропогенне навантаження на ґрунт.

Розроблена математична модель аналізу використання транспортно-виробничого комплексу при вирощуванні сільськогосподарських культур дозволяє здійснювати раціональний вибір наземних та авіаційних транспортних засобів, залежно від параметрів технологій, видів культур.

Таким чином, є підстави стверджувати, про можливість у процесі організації та веденні сільськогосподарського виробництва приймати своєчасні обґрунтовані управлінські рішення з метою отримання максимального прибутку

Ключові слова: технологічний процес, No-till технологія, види ресурсів, технологічна карта, авіаційна техніка, наземна техніка

1. Вступ

Транспортна складова має значний вплив на виробництво продукції сільського господарства залежно від ступеня його інтенсивності та рівня розвитку агропромислової інтеграції, оскільки транспорт бере безпосередню участь у технологічному процесі вирощування сільськогосподарських культур. Ефективне використання транспортно-виробничих ресурсів змушує впроваджувати сучасні ресурсозберігаючі No-till технології вирощування сільськогосподарських культур, що неможливо без удосконалення транспортної складової.

Зважаючи на те, що застосування авіаційного транспорту у технологічному процесі вирощування сільськогосподарських культур сприяє впровадженню інноваційної ресурсозберігаючої No-till технології, актуальним слід вважати дослідження спрямовані на подальше удосконалення виконання аграрних робіт з урахуванням інтегрованої транспортної системи [1]. Ефективність функціонування цієї системи полягає у раціональному використанні наземної та авіаційної техніки, що призведе до зменшення матеріальних та фінансових ресурсів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Прогрес у впровадженні ресурсозберігаючих технологій та ефективності функціонування транспортних систем у сільському господарстві сприяв поглибленню вивчення та удосконалення машин для безполцевого основного обробітку ґрунту та посівних машин. Запропонована конструкція комбінованого дизельного глибокорозпушувача із додатковими деформаторами та спареними зубчастими котками, використання якого дозволяє досягти покращених показників якості обробки під час роботи на важких ґрунтах [2]. На основі розрахунків [3] встановлено, що мінеральні добрива зменшують ресурс розглядуваних елементів в більшій мірі ніж органічні. Проведеними дослідженнями на насінні цукрових буряків, сої, соняшнику та кукурудзи доведено універсальність запропонованого висівного апарата, застосування якого збільшує технологічну ефективність висіву насіння просапних культур та зменшує енергоємність процесу. Встановлено, що один висівний диск дозволяє дозувати всі перераховані види насіння просапних культур з достатньою точністю [4, 5]. Однак слід зазначити, що в даних роботах не наведені етапи технологічного процесу вирощування сільськогосподарських культур та його транспортне забезпечення. Це означає, що не визначено, як саме впливає вибір транспортних засобів для внесення мінеральних добрив, здійснення захисту рослин на рівень врожайності.

З практичної точки зору це може викликати труднощі, що пов'язані з визначенням ефективності застосування транспортних засобів в аграрному секторі. Для подолання цієї проблеми в роботі [6] проведені дослідження, якими доведено, що на ефективність використання транспортних засобів суттєво впливають наступні фактори: природно-кліматичні умови, швидкість руху, енергетичні показники, вантажопідйомність, відстань перевезень і багато інших. Показано, що найбільш перспективним напрямом є підвищення ефективності транспортно-технологічного забезпечення агропромислового комплексу за рахунок оптимізації енергозатрат. Незважаючи на практичну значущість таких результатів, не розглянуто в достатній мірі ефективність використання авіаційного транспорту, що є важливим для впровадження ресурсозберігаючої No-till технології. Очевидно це пов'язано зі складністю застосування системного підходу щодо вирішення задачі мінімізації маршруту повітряного судна під час обробки поля необхідними хімікатами. Дана задача вирішується у роботі [7, 8] з використанням існуючих програмних продуктів, які гарантують певний альтернативний вибір для користувачів.

Доцільність використання авіаційного транспорту в порівнянні з наземною технікою при виконанні аграрних робіт, підтверджується підвищенням урожай-

ності на 10 %, по швидкості обробітку у 15 разів, по продуктивності та витратах палива у 6 разів [9]. Однак на підтвердження цієї гіпотези не наведені відповідні математичні розрахунки щодо використання транспортно-виробничих ресурсів.

Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність оптимального використання транспортно-виробничого комплексу з урахуванням авіаційної складової обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

При транспортно-технологічному процесі забезпечення вирощування сільськогосподарських культур в систему технологій і транспортних засобів, в першу чергу, повинні увійти транспортні засоби з високим рівнем пристосованості до зональних та сезонних варіацій умов експлуатації. Це дозволить повною мірою реалізувати потенційні якості, закладені при проектуванні і виробництві [6, 10].

Системний підхід до дослідження транспортного забезпечення технологічного процесу є спрямованим на виявлення функціональних особливостей, властивостей, механізмів взаємодії між підсистемами і елементами з урахуванням впливу зовнішнього середовища даних систем. Тому важливим є визначення місця транспортної складової в системі аграрних робіт (САР) [11].

Система аграрних робіт являє собою сукупність способів і методів виконання певних робіт, яка реалізується на заданій технічній базі з урахуванням проведення різних видів робіт. Ця система повинна відображати всі значущі для досягнення необхідного ефекту фактори зовнішнього та внутрішнього середовища.

Транспортне забезпечення технологічного процесу, яке застосовується в аграрному секторі, розглядається в якості одного з необхідних елементів сучасного сільськогосподарського виробництва, без якого неможливе виконання цілої низки важливих технологічних операцій для забезпечення вирощування сільськогосподарських культур. Транспортну складову оброблення сільськогосподарських культур утворюють наземні та авіаційні транспортні засоби, які мають свої специфічні особливості щодо функціонального призначення.

Сільське господарство завдяки впровадженню інноваційних технологій вирощування сільськогосподарських культур стрімко змінюється. Спостерігається високий ступінь витрат на застосування промислових засобів відтворення родючості ґрунту та захисту рослин від шкідливих організмів із високою окупністю їх приростами врожаю.

Аналіз впливу агротехнічних заходів на врожайність сільськогосподарських культур при сумісному їх виконанні показав, що біля 40 % припадає на внесення агрохімікатів, 15–25 % – на захист рослин, 20 % – на сорти та гібриди і 15–20 % – на обробку ґрунту, що є найбільш ресурсовитратним елементом технології.

При існуючих технологіях організації сільського господарства врожай на 80 % залежить від природи. А при системі No-Till вплив клімату на ефективність рослинництва зведений до 20 %, а інші 80 % залежать від технології та вибору транспортного засобу (рис. 1) [12].

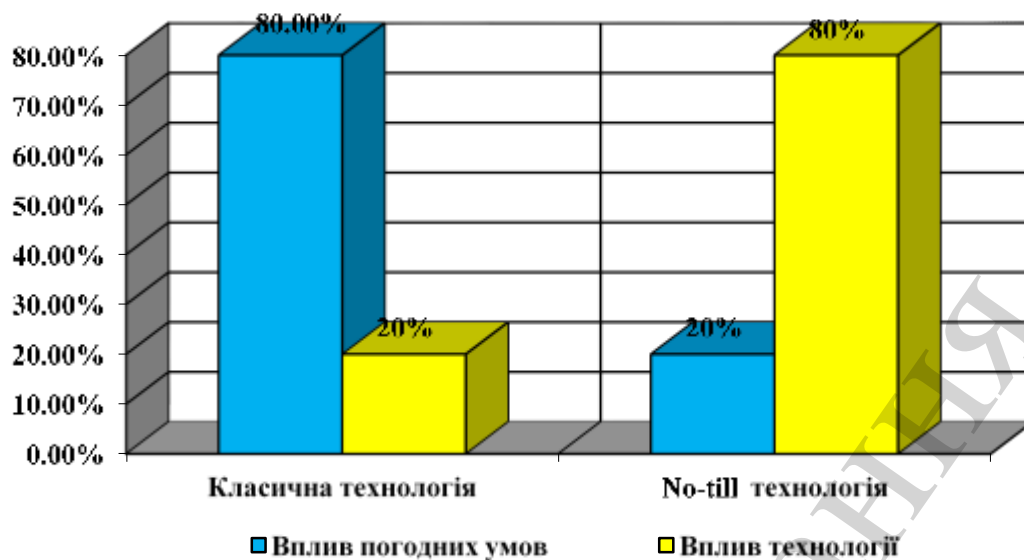


Рис. 1. Рівень залежності врожаю від впливу факторів погодних умов та технології

В умовах впровадження ресурсозберігаючих технологій в аграрному секторі пріоритетом є збереження і примноження матеріального та грошового капіталу. Мінімізація обробки зменшує антропогенне навантаження на ґрунт, що впливає на зменшення прямих матеріально-технічних витрат, затрати праці в технологічному процесі та підвищує конкурентоспроможність продукції.

Для об'єктивної оцінки функціонування транспортно-технологічного процесу для забезпечення вирощування сільськогосподарських культур слід застосовувати системний підхід, оскільки транспортна складова є підсистемою системи аграрних робіт, що зазначене у попередніх дослідженнях.

Системний підхід – поняття, що підкреслює значення комплексності, широти охоплення і чіткої організації в дослідженні, проектуванні й плануванні. Системний підхід спирається на відомий діалектичний закон взаємозв'язку і взаємозумовленості явищ у світі й суспільстві. Такий підхід вимагає розглядати досліджувані явища й об'єкти не тільки як самостійну систему, але й як підсистему деякої великої системи [13].

Отже транспортну складову для забезпечення вирощування сільськогосподарських культур необхідно розглядати у взаємозв'язку з технологічними процесами виконання аграрних робіт в умовах змін критеріїв ефективності застосування наземних та авіаційних транспортних засобів. Також важливим фактором впливу на рівень врожайності є вибір транспортних засобів для хімічної обробки сільськогосподарських угідь.

Інтегрована система захисту від шкідників, хвороб і бур'янів включає комплекс профілактичних екологічно безпечних та економічно доцільних організаційно-господарських, агротехнічних, біологічних, генетичних, хімічних заходів та інші методів.

У середньому втрати рослинницької продукції від шкідливих організмів становлять 30 %, а в період спалахів розмноження шкідників, хвороб та при сильно-

му засміченні полів бур'янами вони можуть перевищувати 50 %, а інколи врожай гине повністю. Так, без здійснення заходів щодо захисту навіть на високому агро-технічному фоні можна одержати врожай зерна озимої пшениці та ще й низької якості лише у межах 20–40 ц/га, тим часом, як при належному захисті – 70–100 ц/га. Отже, у такому разі кожен третій, а інколи й другий гектар орної землі хлібороб засіває, щоб підтримати життєдіяльність шкідливих організмів.

Тому вибір транспортного забезпечення для задоволення технологічного процесу при захисті рослин від шкідливих організмів, надзвичайно важливий і досягається за допомогою авіаційних та наземних транспортних засобів. Аналізуючи структуру наземних та авіаційних транспортних засобів, які забезпечують технологічний процес вирощування сільськогосподарських культур, доведено, що левова частина обробки площі посівів виконується наземними транспортними засобами. Що стосується авіаційних транспортних засобів, то частка його коливається в межах від 3 % до 8 %, а це говорить про недостатню увагу щодо ефективності його використання. А саме авіаційні транспортні засоби можуть сприяти впровадженню новітніх ресурсозберігаючих No-Till технологій [14, 15].

Застосування авіаційних транспортних засобів в сільськогосподарському виробництві дозволяє своєчасно та рівномірно вносити мінеральні добрива, регулятори росту рослин, десиканти і дефоліанти, засоби захисту рослин тощо. Авіаційний спосіб обробки також запобігає пошкодженню посівів, які відбуваються при застосуванні наземної техніки. Внаслідок цього приріст врожаю сільськогосподарських культур складає тільки на зернових в середньому до 30 %, на інших сільськогосподарських культурах – до 25 % їх середньої врожайності.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою дослідження є оптимізація використання транспортно-виробничих ресурсів при вирощуванні сільськогосподарських культур шляхом раціонального використання наземних та авіаційних транспортних засобів з урахуванням видів культур та технологій їх вирощування.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити схему транспортного забезпечення технологічного процесу вирощування сільськогосподарських культур з урахуванням авіаційної складової
- розробити математичну модель оптимального використання транспортно-виробничого комплексу для забезпечення вирощування сільськогосподарських культур за критерієм максимізації прибутку
- проаналізувати експериментальні результати розв'язку математичної моделі.

4. Матеріали та методи дослідження щодо раціонального використання транспортно-виробничих ресурсів

4.1. Транспортне забезпечення технологічного процесу вирощування сільськогосподарських культур з урахуванням авіаційної складової

Система No-Till – найбільш розумний підхід до рослинництва, обґрунтований з точки зору екології та економіки [13, 16–19]. При цьому виключається

механічний вплив на ґрунт, а це означає, що на етапі проведення заходів із захисту рослин доцільніше застосовувати саме авіаційні транспортні засоби.

Має місце проведення агроавіаційних робіт по захисту рослин від хвороб, шкідників та бур'янів, десикацію соняшнику, підживлення сільськогосподарських культур рідкими комплексними та сипучими мінеральними добривами в період вегетації, позакореневе підживлення сільськогосподарських культур, авіаційне розселення трихограм. Багаторічний досвід застосування авіаційних транспортних засобів довів, що авіаційний спосіб за біологічною і господарською продуктивністю не поступається наземному, а й перевищує його.

Ефективне функціонування транспортно-технологічного процесу для забезпечення вирощування сільськогосподарських культур можливе тільки за допомогою наукових знань про організацію, технологію та методи управління виробництвом сільськогосподарської продукції. Тому важливим є дослідження технологічних етапів процесу вирощування сільськогосподарських культур та участь транспортних засобів при виконанні технологічних операцій кожного етапу. Таке дослідження дасть можливість сформулювати схему раціонального транспортного забезпечення технологічного процесу вирощування сільськогосподарських культур залежно від умов та вимог виконання певного етапу вирощування.

Технологія аграрних робіт включає в себе такі основні етапи виробництва: підготовка до роботи, забезпечення роботи, виконання роботи та заключні роботи [11].

Для виконання умов ресурсозберігаючих No-Till технологій, пропонується більше залучення авіаційних транспортних засобів при виконанні заходів захисту рослин в період вегетації, а також при допоміжних роботах та сівбі.

Структурна схема транспортного забезпечення аграрних робіт при вирощуванні сільськогосподарських культур з розподілом наземних та авіаційних транспортних засобів в залежності від виду цих робіт представлена на рис. 2. Такий розподіл забезпечить раціональне застосування цих видів транспорту з урахуванням техніко-економічних особливостей.

Транспортно-технологічний процес при вирощуванні сільськогосподарських рослин є складним об'єктом з точки зору моделювання єдиного виробничого циклу, який би включав в себе всі необхідні прийоми. Одним із завдань, що вирішуються на етапі підготовки до проведення аграрних робіт, є виявлення та забезпечення готовності транспортної складової та технологій, які будуть використовуватися, оскільки лише збалансована готовність окремих підсистем забезпечує своєчасність та ефективність проведених агроавіаційних та наземних робіт.

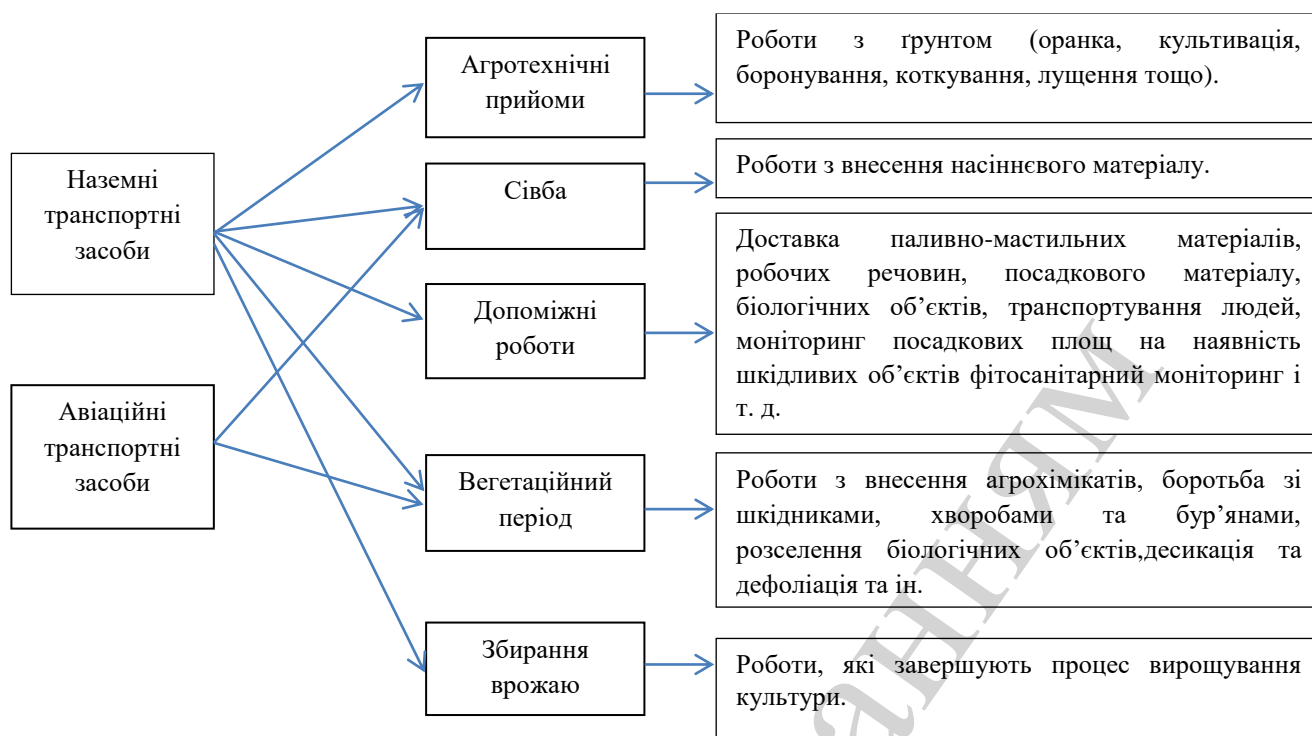


Рис. 2. Схема транспортного забезпечення технологічного процесу вирощування сільськогосподарських культур

Транспортне забезпечення технології вирощування сільськогосподарських культур включає в себе наступні складові: агротехнічні прийоми, сівба, допоміжні роботи, вегетаційний період та збір врожаю. Наземні транспортні засоби (НТЗ) та авіаційні транспортні засоби (АТЗ) виступають технічними засобами для досягнення мети, в даному випадку, вирощування сільськогосподарських культур і одержання високих врожаїв (рис. 2).

Агротехнічні прийоми включають в себе: роботи з ґрунтом (оранка, культивування, боронування, коткування, лушення і т. д.) та виконуються виключно наземними транспортними засобами.

Сівба виконується сільськогосподарськими спеціалізованими машинами. Але літаки також можуть виконувати даний вид робіт, особливо при посіві пасовищ. Даний вид агроавіаційних робіт називається аеросівба.

Допоміжні роботи. До цих робіт слід віднести всі допоміжні операції, які здебільшого виконуються автомобільними вантажними транспортними засобами. До них відносяться: доставка паливно-мастильних матеріалів, робочих речовин, посадкового матеріалу, біологічних об'єктів, транспортування людей, моніторинг посадкових площ на наявність шкідливих об'єктів і т. д. Авіаційні транспортні засоби також можуть долучитися до допоміжних робіт у сфері фіто та санітарного моніторингу за допомогою спектральних камер, які встановлюють на повітряні судна.

Вегетаційний період це догляд за посівами, який складається зі внесення агрохімікатів, боротьби зі шкідниками, хворобами та бур'янами, а також з розселення біологічних об'єктів і за потреби десикації та дефоліації. Дані операції можуть

виконувати наземні та авіаційні транспортні засоби. Але переваги авіаційних транспортних засобів очевидна і полягають в оперативності, продуктивності і, як наслідок, суттєвому підвищенні врожайності сільськогосподарських культур.

Збирання врожаю виконується виключно спеціалізованими сільськогосподарськими машинами.

В цих умовах склалася жорстка конкуренція між наземними та авіаційними видами транспортних засобів. Але працюючи на досягнення спільної мети щодо одержання високих та якісних врожаїв в сільському господарстві потрібно не конкурувати між собою, а обирати раціональне використання наземного та авіаційного транспортного засобу при виконанні аграрних робіт.

4. 2. Математична модель оптимального використання транспортно-виробничого комплексу для забезпечення вирощування сільськогосподарських культур

Для вирішення ефективного функціонування інтегрованої транспортної системи в аграрному комплексі пропонується використання оптимізаційної моделі, в основу якої покладено розподіл ресурсів та динамічне планування.

З погляду окремого господарства, організацію і ведення сільськогосподарського виробництва можна розглядати як управління складною динамічною системою в умовах дії випадкових чинників. Складність системи полягає у наявності великої кількості різних підсистем – земельні ділянки, культури, наземні транспортні засоби, механізми й обладнання, авіаційні транспортні засоби, добрива, речовини, паливо, люди. Динамічність полягає як у природі виробничого процесу – вирощуванні рослин упродовж природного річного циклу, так і у впливі попереднього циклу та раніш вирощувані культури і виконаних робіт на ефективність дій у наступних часових періодах. Випадковими чинниками є погодні умови, поява та розповсюдження шкідників і хвороб рослин, а також зміна цін на ресурси, послуги та кінцеву продукцію.

В господарстві можливо вирощування певної множини культур K , не кожна з яких обов'язково вирощується кожен рік. Вибір підмножини культур $K_t \subseteq K$, що будуть вирощуватися в році t , є предметом моделювання і пошуку оптимальних варіантів.

У якості критерію оптимальності будемо розглядати прибуток, який може отримати господарство від вирощування культур за результатами виробничого року. Для кожної операції $\omega \in \Omega_v$ згідно варіанту $v \in V_{kip}$ визначені витрати c_{ovki} (в у. о.), які будемо розглядати як змінні витрати. Додаткові ресурси \bar{p}_τ^A , \bar{p}_τ^H орендованої техніки слід розглядати як вектори з дискретними приростами значень елементів. Тобто, неможливо орендувати півлітака або чверть. Можна залучити один літак або два, тому відповідні додаткові ресурси можуть змінюватися дискретно і за кожну зміну ми маємо сплачувати певну фіксовану плату. Отже, витрати, що пов'язані із використанням залучених авіаційних та наземних транспортних засобів, будуть мати дискретну та неперервну складову.

Нехай $K_{ipt} \subseteq K$ буде множиною культур, вирощування яких доцільно розглядати на полі i в році t після попередника p . Вибір культури для поля i в році

t буде визначатися булевими змінними x_{ki} , сума яких має дорівнювати одиниці $\sum_{k \in K_{ipt}} x_{ki} = 1$, що означає вибір тільки однієї культури.

Для кожної культури $k \in K_{ipt}$ існує множина варіантів (технологій) її вирощування V_{kip} . Під окремим варіантом слід розуміти не абстрактну технологію, а скоріше конкретну технологічну карту, прив'язану до поля та його умов, які включають культуру-попередник, характеристики ґрунту, розташування та рельєф місцевості. Вибір варіанта $v \in V_{kip}$ буде визначатися булевими змінними y_{vki} , сума яких по варіантах $\sum_{v \in V_{kip}} y_{vki} = x_{ki}$ має дорівнювати нулю або одиниці в залежності від значення змінної x_{ki} , що означає, що має бути вибраний хоча б один варіант вирощування культури k , якщо вона буде вирощуватися на полі i .

Використовуючи вище введені поняття та позначення, випишемо модель у вигляді оптимізаційної задачі:

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in I_t} \sum_{k \in K_{ipt}} \sum_{v \in V_{kip}} \left(d_k U_{vki} - \sum_{\omega \in \Omega_v} c_{\omega vki} \sum_{\tau=\tau_b^{\omega}}^{\tau_e^{\omega}} z_{\omega vki}^{\tau} \right) - \\ & - \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_N} \left((\Delta \bar{c}_{\tau}^A, \bar{\rho}_{\tau}^A) + (\Delta \bar{c}_{\tau}^H, \bar{\rho}_{\tau}^H) + (\Delta \bar{c}_{\tau}^L, \bar{\rho}_{\tau}^L) \right) - (\Delta \bar{c}^M, \bar{\rho}^M) \rightarrow \max, \end{aligned} \quad (1)$$

де $c_{\omega vki}$ – змінні витрати на виконання операції ω у варіанті вирощування v культури k на полі i ;

$i \in I_t$ – індекс окремого поля;

$k \in K_{ipt}$ – індекс окремої культури;

$v \in V_{kip}$ – індекс окремого варіанта;

$\omega \in \Omega_v$ – індекс окремої операції;

$\tau \in [\tau_1, \tau_N]$ – номер окремого періоду;

d_k – очікувана вартість культури k на ринку;

U_{vki} – змінна моделі – очікуваний урожай культури k на полі i при варіанті вирощування v ;

$\bar{\rho}^M$ – змінні моделі – вектор додаткових об'ємів добрив, речовин, ПММ, придбаних для виконання робіт у виробничому сезоні;

$\bar{\rho}_{\tau}^A, \bar{\rho}_{\tau}^H, \bar{\rho}_{\tau}^L$ – змінні моделі – обсяги додатково залучених авіаційних та наземних ресурсів і працівників;

$z_{\omega vki}^{\tau}$ – змінна моделі – частка операції ω варіанту вирощування v культури k на полі i що виконується в період τ ;

$\Delta \bar{c}^M$ – вектор збільшення вартості додаткових об'ємів добрив, речовин, ПММ порівняно з вартостями запасів, врахованих в $c_{\omega vki}$;

$\bar{c}_{\tau}^A, \bar{c}_{\tau}^H, \bar{c}_{\tau}^L$ – вектори збільшення вартостей додатково залучених авіаційних, наземних та людських ресурсів порівняно з вартостями, урахованими у $c_{\omega vki}$.

Щоби відобразити залежність очікуваного врожаю культури k на полі i при варіанті v її вирощування від обсягів та строків виконання операцій будемо використовувати лінійну регресійну модель виду

$$U_{vki} = U_{vki}^0 y_{vki} + \sum_{\omega \in \Omega_v} \sum_{\tau=\tau_b^{\omega}}^{\tau_e^{\omega}} u_{\omega vki}^{\tau} z_{\omega vki}^{\tau},$$

$$v \in V_{kip}, \quad k \in K_{ipt}, \quad i \in I_t, \quad (2)$$

де y_{vki} – булева змінна моделі – вибір варіанта вирощування культури k на полі i ; U_{vki}^0 , $u_{\omega vki}^{\tau}$ – коефіцієнти регресії, які відображають залежність урожаю культури k при варіанті вирощування v на полі i від обсягів та термінів виконання операцій $\omega \in \Omega_v$.

Такий вираз відображає залежність очікуваного врожаю в певних межах. Тому його, радше, треба розглядати як залежність відхилення врожаю від очікуваного рівня. І не для всіх операцій ми будемо дозволяти неповне виконання, а також обмежимо зменшення об'єму для тих, яким дозволимо зменшення. Водночас, це дозволяє враховувати вплив строків виконання операцій на урожай за допомогою різних значень коефіцієнтів $u_{\omega vki}^{\tau}$ для однієї операції ω : для більш сприятливих періодів τ в межах інтервалу $[\tau_b^{\omega}, \tau_e^{\omega}]$ цей коефіцієнт має бути більшим, для менш сприятливих – меншим. Урожай U_{vki} є змінною оптимізаційної моделі. Ці коефіцієнти мають враховувати площу та особливості поля.

Обмеження на об'єми ресурсів авіаційних транспортних засобів, обсяги ресурсів наземного транспорту та механізмів, обсяги добрив, речовин, ПММ та інших речовин, обсяги часу залучених у період τ спеціалістів та працівників, які можуть бути використані господарством у період визначають вирази:

$$\sum_{i \in I_t} \sum_{k \in K_{ipt}} \sum_{v \in V_{kip}} \sum_{\omega \in \Omega_v} \bar{w}_{\omega vki}^A z_{\omega vki}^{\tau} \leq \bar{\rho}_{\tau}^A, \quad \tau \in [\tau_1, \tau_N]; \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I_t} \sum_{k \in K_{ipt}} \sum_{v \in V_{kip}} \sum_{\omega \in \Omega_v} \bar{w}_{\omega vki}^H z_{\omega vki}^{\tau} \leq \bar{R}_{\tau}^H + \bar{\rho}_{\tau}^H, \quad \tau \in [\tau_1, \tau_N]; \quad (4)$$

$$\sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_N} \sum_{i \in I_t} \sum_{k \in K_{ipt}} \sum_{v \in V_{kip}} \sum_{\omega \in \Omega_v} \bar{w}_{\omega vki}^M z_{\omega vki}^{\tau} \leq \bar{R}^M + \bar{\rho}^M; \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I_t} \sum_{k \in K_{ipt}} \sum_{v \in V_{kip}} \sum_{\omega \in \Omega_v} \bar{w}_{\omega vki}^L z_{\omega vki}^{\tau} \leq \bar{R}_{\tau}^L + \bar{\rho}_{\tau}^L, \quad \tau \in [\tau_1, \tau_N], \quad (6)$$

де $\bar{w}_{\omega vki}^A$, $\bar{w}_{\omega vki}^H$, $\bar{w}_{\omega vki}^M$, $\bar{w}_{\omega vki}^L$ – вектори прямих витрат авіаційних та наземних ресурсів, добрив, речовин, ПММ та трудових ресурсів на виконання операції ω у варіанті вирощування v культури k на полі i ;

\bar{R}_τ^H , \bar{R}_τ^M , \bar{R}_τ^L – вектори наявних у господарстві наземних ресурсів, добрив, речовин, ПММ та людських ресурсів. Наявність наземних та людських ресурсів обмежується для кожного періоду; наявність добрив, речовин, ПММ – сумарно для усіх періодів.

Допустимі межі варіації обсягу виконання операцій залежно чи обраний варіант вирощування чи ні ($0 \leq \alpha_{\omega vki} \leq 1$) описуються виразом:

$$\alpha_{\omega vki} y_{vki} \leq \sum_{\tau \in [\tau_b^\omega, \tau_e^\omega]} z_{\omega vki}^\tau \leq y_{vki},$$

$$\omega \in \Omega_v, v \in V_{kip}, k \in K_{ipt}, i \in I_t, \quad (7)$$

де $\alpha_{\omega vki}$ – коефіцієнт допустимого зменшення обсягу виконання операцій $\omega \in \Omega_v$ у варіанті вирощування v культури k на полі i , за якого зберігається адекватність формули (1) залежності врожаю від обсягів та термінів виконання операцій; $[\tau_b^\omega, \tau_e^\omega]$ – інтервал періодів, упродовж якого може виконуватися операція, включаючи найбільш раннє та найбільш пізнє виконання.

Логічна умова чи будуть обиратися варіанти вирощування культури залежно від того чи буде вирощуватися культура на полі має вигляд:

$$\sum_{v \in V_{kip}} y_{vki} = x_{ki}, k \in K_{ipt}, i \in I_t, \quad (8)$$

де x_{ki} – булева змінна моделі – вибір культури, що буде вирощуватися на полі i .

Вимога вибрати одну культуру для вирощування на полі в році описується виразом:

$$\sum_{k \in K_{ipt}} x_{ki} = 1, i \in I_t. \quad (9)$$

Області визначення змінних x_{ki} , y_{vki} , $z_{\omega vki}^\tau$ задаються такими виразами:

$$x_{ki} \in \{0,1\}, k \in K_{ipt}, i \in I_t; \quad (10)$$

$$y_{vki} \in \{0,1\}, v \in V_{kip}, k \in K_{ipt}, i \in I_t; \quad (11)$$

$$z_{\omega vki}^\tau \geq 0, \tau \in [\tau_1, \tau_N], \omega \in \Omega_v,$$

$$v \in V_{kip}, k \in K_{ipt}, i \in I_t. \quad (12)$$

Область визначення змінних \bar{p}_τ^A , \bar{p}_τ^H розраховують за виразом:

$$\bar{p}_\tau^A \in \bar{\Theta}^A, \bar{p}_\tau^H \in \bar{\Theta}^H, \quad (13)$$

де $\bar{\Theta}^A$, $\bar{\Theta}^H$ – множини, що є областями визначення змінних \bar{p}_τ^A , \bar{p}_τ^H , які можуть бути як неперервними, так і дискретними.

Ці змінні розглядаються як дискретні, які можуть приймати скінченну множину значень, і відображають можливість господарства залучати сторонні авіаційні та наземні ресурси. Але для деяких видів ресурсів можливі і неперервні змінні.

5. Аналіз експериментальних результатів розв'язку математичної моделі

Запропонована модель дозволяє здійснити раціональний вибір транспортно-виробничих ресурсів, культур, площі під ці культури та технології їх вирощування. Розрахунок за допомогою моделі визначає оптимальне використання власних та додаткових ресурсів за критерієм максимізації прибутку. Розв'язуючи задачу (1)–(13) при різних значеннях фіксованих параметрів, що задають перелік культур, полів, технологій, ресурсів, можна досліджувати як впливають зміни цих параметрів на оптимальний розв'язок та величину прибутку.

Для демонстрації такої можливості було обрано приклад даних українського підприємства «Яна Плюс», що містило: 4 культури, 10 технологій вирощування [20]. Змінні моделі x_{ki} , були фіксованими, змінні y_{vki} , розглядалися як неперервні, у обмеженнях (12) використовувалися нерівності. Завдання розв'язувалося як стандартна задача лінійного програмування.

Серед технологій розглядалися як традиційні технології, так і No-till технології, які використовують і не використовують авіаційні транспортні засоби.

Увесь інтервал планування складався з двох календарних років, що дозволяло враховувати всі операції по вирощуванню як озимих, так і ярих культур. Окремими періодами τ були календарні дні. На інтервалі планування використовувалися приблизно 450 періодів (днів). Конкретно кількість періодів, що розглядалися у окремій задачі, залежала від обраних для задачі культур і технологій. Першим періодом було обрано 1 січня першого року. Номер мінімального періоду, що використовувався у оптимізаційних задачах, був 180-й, максимального – 630-й.

У прикладі, що наводиться, для кожної культури було виділене поле і можливість вирощування інших культур на цьому полі не розглядалася. Але розглядалася можливість зменшити площу вирощування культури на полі, а також можливість використання різних технологій вирощування культури на різних частинах поля.

Розглядалися технології вирощування різних сільськогосподарських культур підприємства, що наведено у табл. 1.

В стовпчику «Урожайність» вказана максимальна урожайність, що може бути досягнута при виконанні усіх технологічних операцій у повному обсязі. У стовпчику «Витрати» вказані відповідні цій врожайності витрати.

Використання авіаційних транспортних засобів розглядалося у таких операціях: для пшениці – це авіаобробка карбамідом у травні, втрати врожаю при невиконанні 10–25 %; для кукурудзи – це внесення гербіциду в липні, втрати до 30 %; для соняшнику – це авіаційне внесення агрохімікатів весною та десикація восени, втрати по кожній операції до 30 %; для люпину – це авіаційне внесення агрохімікатів навесні, втрати врожаю при невиконанні до 20 %.

Таблиця 1

Вплив технології вирощування на урожайність та собівартість 1 га з урахуванням транспортної складової

№	Культура	Урожайність, т/га	Витрати, у.о/га	Технологія вирощування	Використання авіаційних транспортних засобів
1	Соняшник	2,3	376,96	Технологічна карта вирощування соняшнику	Ні
2	Соняшник	2,0	242,19	No-till Технологічна карта вирощування соняшнику	Так
3	Кукурудза на зерно	5,2	469,09	Технологічна карта вирощування кукурудзи на зерно	Ні
4	Кукурудза на зерно	4,5	336,0	No-till Технологічна карта вирощування кукурудзи на зерно	Так
5	Люпин вузьколистий	2,2	350,27	Технологічна карта вирощування люпину вузьколистого	Так
6	Люпин вузьколистий	2,2	333,5	No-till Технологічна карта вирощування люпину вузьколистого	Так
7	Пшениця озима	5,0	238,25	Технологія обробітку озимої пшениці по непаровим попередникам (1)	Так
8	Пшениця озима	5,0	231,63	Технологія вирощування озимої пшениці по непаровим попередникам (2)	Так
9	Пшениця озима	4,9	210,72	No-till технологія вирощування озимої пшениці по непаровим попередникам (1)	Ні
10	Пшениця озима	4,9	194,77	No-till технологія вирощування озимої пшениці по непаровим попередникам (2)	Так

У табл. 2 перелічені види ресурсів, що враховувалися у прикладі, та вказана їх кількість на добу, яка дозволяла виконувати усі технологічні операції у

повному обсязі для оптимально вибраних технологій. Вважалося, що таких обсяг ресурсів доступний кожного дня протягом усього інтервалу планування.

Таблиця 2

Використання транспортно-виробничих ресурсів у розрахунку на добу

Назва ресурсу	Максимальний доступний обсяг на добу	Одиниці виміру
Трактористи, водії	220	людино-годин
Робітники	70	людино-годин
Alpha_Hardi	10	годин
Case 340	30	годин
Claas	45	годин
CLAAS_Xerion	10	годин
Manitou	20	годин
Ан-2	20	годин
ГАЗ	25	годин
ГАЗель	16	годин
ГАЗ-САЗ-3502	400	т*км
ДОН-1500	52	годин
ДТ-75	30	годин
ЗАВ-60	35	годин
К-744	40	годин
КАМАЗ	125	годин
Камаз	4000	т*км
МТЗ-1221	5	годин
МТЗ-80/82	30	годин
СК-5	1	годин
Т-150	20	годин
ХТЗ-17221	15	годин

Серед перелічених видів ресурсів назви тракторів, комбайнів, автомобілів. У якості авіаційних транспортних засобів розглянутий літак Ан-2. Для більшості ресурсів вказаний максимальний обсяг використання на добу у годинах, для двох автомобілів – у тонно-кілометрах. Це пов'язано із використаними зразками технологічних карт.

При розрахунках використано ряд загальних параметрів (табл. 3).

При вказаних значеннях параметрів та при повному забезпеченні ресурсами для всіх культур використовуються No-till технології на всіх (100 %) запланованих площах та досягається планова урожайність, яка є максимальною в даній в моделі. Економічний результат наведено у табл. 4.

Цей результат будемо називати «базовим» і порівнювати із ним результати розрахунків при іншому співвідношенні обсягів ресурсів.

Проведені дослідження при «забороні» використовувати авіаційні транспортні засоби, тобто при відсутності льотного ресурсу (табл. 5).

Таблиця 3
Вартісні показники використання ресурсів

Назва параметра	Величина	Одиниці
Вартість 1 т*км перевезення	0,06	у. о.
Вартість 1 квт*год електроенергії	0,07	у. о.
Ціна дизелю	0,78	у.о/л
Коефіцієнт збільшення на бензин та мастило	1,1	-
Нарахування на фонд оплати праці	0,261	-
Вартість ремонту від амортизації	90 %	-

Таблиця 4
Результати розрахунків за вказаних значень параметрів та повного забезпечення ресурсами із застосування No-till технології

Культура	Площа ви-кор., га	Урожай-ності, т/га	До-хід, тис. у. о.	Витра-ти, тис. у. о.	Техн. вирощ. з табл. 1
Соняшник	1391 (100 %)	2,0 (100 %)	1031,0	337,0	2
Кукурудза на зерно	431 (100 %)	4,5 (100 %)	324,0	145,0	4
Люпин вузьколистий	18 (100 %)	2,2 (100 %)	8,0	6,0	6
Пшениця озима	678 (100 %)	4,9 (100 %)	616,0	132,0	10
Усього разом	2518	—	1977,0	620,0	—
Прибуток	—	—	1357,0	—	—

Таблиця 5
Рівень врожайності при відсутності застосування авіаційних транспортних засобів на певних технологічних операціях

Культура	Площа ви-кор., га	Урожай-ності, т/га	Дохід, тис.у. о.	Витра-ти, тис.у. о.	Техн. вирощ. з табл. 1
Соняшник	1391 (100 %)	1,98 (86 %)	1021,9	496,1	1
Кукурудза на зерно	431 (100 %)	5,2 (100 %)	373,6	202,2	3
Люпин вузьколистий	18 (100 %)	1,72 (80 %)	5,9	5,4	6
Пшениця озима	678 (100 %)	4,9 (100 %)	615,3	142,9	9
Усього разом	2518	—	2016,7	846,5	—
Прибуток	—	—	1170,1	—	—

При таких обмеженнях в оптимальному розв'язку задачі використовуються технології 1, 3, 9, в яких відсутні авіаційні операції. При цьому технології 1 і 3 не є No-till, а технології 6 та 9 є No-till технологіями. Задіяні усі площі. Для люпину вузьколистого зменшується врожайність через втрати від невиконання авіаційного

внесення агрохімікатів. Втрати врожаю для соняшнику обумовлені нестачею робітників і неможливістю виконати в якісь періоди усі роботи для усіх культур. Збільшення ресурсу робітників до 250 людино-годин на добу достатньо для отримання 100 % врожайності і по соняшнику за «звичайною» технологією. При цьому врожайність по ній є більшою – 2,3 т/га порівняно із 2,0 для No-till технології. Але при достатності усіх ресурсів в оптимальний розв'язок вибирається No-till технологія з меншою врожайністю, але і з меншими витратами.

«Реакція» оптимального розв'язку задачі на зміну обсягів доступних ресурсів є зовсім не «тривіальною», як могло б здаватися. Так, вище було показано, що для стовідсоткового виконання технології 1 потрібні додаткові обсяги людино-годин робітників.

Але виявляється, що технологія 1 виконується також і при зменшенні доступного обсягу людино-годин робітників при достатньому обсягу льотних годин. А саме, при зменшенні ресурсу робітників в базовому варіанті до 40 людино-годин на день отримуємо такий оптимальний розв'язок (табл. 6).

Таблиця 6

Рівень врожайності при зменшенні ресурсу робітників до 40 люд./год. на день

Культура	Площа використання, га	Урожайності, т/га	Дохід, тис.у. о.	Витрати, тис.у. о.	Техн. вирощ. з табл. 1
Соняшник	172 (12 %)	2,3 (100 %)	146,9	65,0	1
Соняшник	1219 (88 %)	2,0 (100 %)	902,7	295,2	2
Кукурудза на зерно	431 (100 %)	3,8 (84 %)	271,2	140,9	4
Люпин вузьколистий	18 (100 %)	2,2 (100 %)	7,4	6,0	6
Пшениця озима	542 (80 %)	4,9 (100 %)	492,1	105,7	10
Усього разом	2382	–	1820,3	612,7	–
Прибуток	–	–	1207,6	–	–

В цьому варіанті розв'язку зменшується площа під озиму пшеницю, зменшується обсяг операцій по кукурудзі, а площа, виділена під соняшник, розбивається на дві частини, де використовуються різні технології. Таким чином досягається максимально ефективне використання дефіцитного ресурсу робітників. Всі інші ресурси в цьому варіанті не є дефіцитними.

Були проведені дослідження, як реагує оптимальний розв'язок задачі на зменшення ресурсу часу використання тракторів, комбайнів і машин. В наступному варіанті розрахунку цей ресурс був зменшений до 50 % для Case 340, ГАЗ-САЗ-3502, ДОН-1500, Камаз. Ресурс людино-годин і льотний натомість залишився на рівні базового розрахунку (табл. 7).

Результати досліджень показують, що в цьому випадку використовуються усі No-till технології, які представлені в задачі, зберігається максимальна врожайність культур, але площа під культури зменшується. Це вказує на те, що No-till технології є найменш ресурсовитратними в плані використання наземних транспортних засобів.

Таблиця 7

Рівень врожайності при зменшенні ресурсу часу використання тракторів, комбайнів і машин

Культура	Площа викор., га	Урожайності, т/га	Дохід, тис.у. о.	Витрати, тис.у. о.	Техн. вирощ. з табл. 1
Соняшник	1391 (100 %)	2,0 (100 %)	1030,4	336,9	2
Кукурудза на зерно	416 (96 %)	4,5 (100 %)	312,3	139,9	4
Люпин вузьколистий	18 (100 %)	2,2 (100 %)	7,4	6,0	6
Пшениця озима	150 (22 %)	4,9 (100 %)	136,6	31,7	9
Пшениця озима	222 (33 %)	4,9 (100 %)	201,8	43,3	10
Усього разом	2047	-	1688,2	557,8	-
Прибуток	-	-	1130,4	-	-

Проведення розрахунків передбачає збір, аналіз та первинну обробку даних, зберігання даних певними засобами у відповідних формах, підготовку даних до розрахунків та аналіз і збереження результатів.

Первинна обробка даних та зберігання їх проводилися за допомогою програми Excel. Окремі сторінки в Excel відповідали даним, які були розділені на групи. Це були загальні дані, дані по культурам, дані по технологіям вирощування культур, дані по ресурсам та дані по технологічним картам вирощування окремих культур по окремим технологіям.

Для підготовки даних оптимізаційної задачі у форматі програми оптимізації та обробки результатів оптимізації було застосовано мову програмування Visual Basic for Application, яка дозволяє створювати меню та у програмному режимі обробляти дані з листків Excel.

Для проведення оптимізації використовувався пакет оптимізації Portfolio Safe guard (PSG) фірми American Optimal Decisions (AOOrDa) [21].

Вигляд листка із загальними параметрами наведений вище (табл. 3). Листок для вибору культур, площ їх вирощування та цін продажу має такий вигляд (табл. 8).

Користувач (людина яка проводить розрахунки) може вибрати культури, які будуть розглядатися в задачі оптимізації, їх максимальну площу та очікувану ціну продажу. Назва та код культури вибираються з листків технологічних карт. Код культури використовується при формуванні задачі оптимізації.

Користувач може вибрати технології, які будуть розглядатися в задачі оптимізації, та задати врожайності відмінні від тих, що вказані в технологічних картах. Планові витрати є довідковою інформацією. Код технології збігається з назвою листка технології та використовувалися при формуванні задачі оптимізації.

Формування оптимізаційної задачі полягає у створенні матриць для задачі лінійного програмування у форматі програми PSG. Умова лінійної задачі у форматі PSG відповідає моделі (1)–(13). Вона залишається незмінною при зміні даних та наведена на рис. 3. Цільова функція задачі відповідає (1). Перше обмеження – (2). Друге обмеження – системі обмежень (3)–(6). Обмеження три, чотири – (7), (8).

Таблиця 8

Приклад вибору культур, площ їх вирощування та цін реалізації

Культура	Код культури	Вибрати для оптимізації (1/0)	Площа, га	Ціна продажу, у.о/т
Соняшник	С	1	1391	370,4
Кукурудза на зерно	KZ	1	431	16,7
Люпин вузьколистий	L	0	18	185,2
Пшениця озима	PO	1	678	185,2

```

maximize
    linear(pmatrix_objective)
constraint_1: calculate_crop, = 0
    linearmulti(pmatrix_urozay)
constraint_2: resources_in_time, <=
    vector_resource_limit_in_time
    linearmulti(pmatrix_in_time)
constraint_3: sum_z_y, <= 0
    linearmulti(pmatrix_zy)
constraint_4: sum_y, <= 1
    linearmulti(pmatrix_y)
constraint_5: sum_of_expenditures, = 0
    linearmulti(pmatrix_sum_time)
Box: >= lower_bounds_z
Solver: car

```

Рис. 3. Запис задачі (1)–(13) у форматі PSG

Детальний результат розв'язку формується по вектору оптимальних значень змінних задачі та по вхідним даним задачі.

Результати оптимальних значень для культур представлені у таблиці 9.

Таблиця 9

Результати оптимальних значень для сільськогосподарських культур

Культура	Код культури	Вибрані для оптимізації (1/0)	Площа задана, га	Площа використана, га	% використання
Соняшник	С	1	1391	1391,0	100,0 %
Кукурудза на зерно	KZ	1	431	273,5	63,5 %
Люпин вузьколистий	L	1	18	18,0	100,0 %
Пшениця озима	PO	1	678	352,5	52,0 %

Додатково виводяться витрати по окремим статтям, які представлені в таблиці 10

Таблиця 10

Вартісні показники використання ресурсів

Назва статті	Витрати	Одиниці
Витрати на амортизацію	5549,2	у. о.
Витрати на захист рослин	66191,6	у. о.
Витрати на агрохімікати	166425,0	у. о.
Витрати на електроенергія	4858,4	кв*год
Витрати на фонд зарплати	13452,2	у. о.
Інші витрати	82597,1	у. о.
Витрати на насіння	117572,5	у. о.
Витрати на пальне	58308,2	літри
Сумарний пробіг	25378,4	т*км

Використання ресурсів показано в табл. 11. Як вказувалося у табл. 2, обсяг ресурсів на 1 день вимірюється в годинах (суфікс _Н) або в т*км (суфікс _Т). Ресурс персоналу вимірюється в людино-годинах.

Таблиця 11

Вибір транспортно-виробничих ресурсів для забезпечення технологічного процесу вирощування сільськогосподарських культур

Назва ресурсу	Макс. доступний обсяг на 1 добу	Макс. отримане використання на добу	Період з макс. використанням	Ресурси, які програма вважає дефіцитними та ефект збільшення доступного обсягу на 1 (тис.у. о.)	Сума використання за всі періоди
EmPtY_Н	40	40,0	257	0	293,7
EmPtY_Т	0	0	0	0	0
Case_340_Н	20	20,0	485	23,7	204,5
ХТЗ-17221_Н	15	10,0	565	0	144,7
К-744_Н	40	0	195	0	0
Manitou_Н	20	16,7	485	0	126,3
Ан-2_Н	20	20,0	443	0	464,8
ГАЗ_Н	25	25,0	485	0	280,6
ГАЗель_Н	16	16,0	489	0	146,1
ГАЗ-САЗ-3502_Т	200	200,0	226	0	5992,1
ДОН-1500_Н	26	26,0	546	9,7	264,3
ДТ-75_Н	30	30,0	433	0	49,9
ЗАВ-60_Н	35	35,0	546	0	71,4
CLAAS_Xerion_Н	10	0	243	0	0
КАМАЗ_Н	125	125,0	623	0	3858,5
Robit	70	70,0	468	0	1705,4
МТЗ-1221_Н	5	5,0	485	0	20,5
МТЗ-80/82_Н	30	29,1	433	0	258,1
СК-5_Н	1	1,0	530	0	2,7
Т-150_Н	20	17,9	258	0	62,9
Vodii	220	218,2	487	0	5112,6
Alpha_Hardi_Н	10	10,0	565	,0	144,7
Claas_Н	45	45,0	617	0	471,1

Максимальне використання ресурсу на добу знаходиться при аналізі результату розв'язку оптимізаційної задачі, а саме, отриманих значень прямих змінних. Якщо максимальне використання дорівнює максимальному доступному обсягу на добу, то це ще не означає, що ресурс є «дефіцитним». Скоріше це є властивістю розв'язку задачі лінійного програмування, коли використання ресурсу є нерівномірним по періодам, коли він міг бути використаним в тій чи іншій операції. Один з періодів, коли було максимальне використання ресурсу, показаний у табл. 11. Дефіцитність ресурсів визначається при аналізі отриманих значень двоїстих змінних. Їх значення вказують наскільки може збільшитися прибуток, якщо збільшити доступний обсяг ресурсу на одиницю. Це є умовне значення, оскільки при збільшенні обсягу одного виду ресурсу «дефіцитним» може стати інший ресурс і очікуваного приросту прибутку не буде. Сума використання – це сума використання ресурсу по всіх періодах планового інтервалу.

6. Обговорення результатів дослідження математичного моделювання транспортно-виробничого комплексу з урахуванням авіаційної складової

При розробці схеми транспортного забезпечення технологічного процесу вирощування сільськогосподарських культур (рис. 2) для виконання умов ресурсозберігаючих No-Till технологій запропоновано більше залучення авіаційних транспортних засобів при виконанні заходів захисту рослин в період вегетації, а також при допоміжних роботах та сівбі. Такий розподіл забезпечує раціональне застосування авіаційних та наземних видів транспорту з урахуванням техніко-економічних особливостей. Сівба виконується сільськогосподарськими спеціалізованими машинами. Але літаки також можуть виконувати даний вид робіт, особливо при посіві пасовищ.

Що стосується допоміжних робіт, то авіаційні транспортні засоби також можуть долучитися до цих робіт у сфері фіто- та санітарного моніторингу за допомогою спектральних камер, які встановлюють на повітряні судна.

Вегетаційний період – це догляд за посівами, який складається зі внесення агрохімікатів, боротьби зі шкідниками, хворобами та бур'янами, а також з розселення біологічних об'єктів і за потреби десикації та дефоліації. Дані операції можуть виконувати наземні та авіаційні транспортні засоби. Але перевага авіаційних транспортних засобів очевидна і полягає в оперативності, продуктивності і, як наслідок, суттєвому підвищенні врожайності сільськогосподарських культур, що доведено у роботі [9].

З використанням розробленої математичної моделі (1)–(13) проведені дослідження можливого розв'язку різних задач при різних значеннях фіксованих та змінних параметрів, що дали можливість дослідити як впливають зміни цих параметрів на оптимальний розв'язок та величину прибутку.

Отримані результати розрахунків показують, що при достатності усіх ресурсів в оптимальний розв'язок вибирається No-till технологія з меншою врожайністю, але і з меншими витратами. За цим результатом (табл. 4) сума доходу склала 1977,0 тис. у. о., витрати 620,0 тис. у. о. та прибуток 1357,0 тис. у. о. Цей результат (табл. 4) порівнювали з результатами розрахунків при іншому співвідношенні обсягів ресурсів:

– відсутності виконання авіаційними транспортними засобами деякі технологічні операції (табл. 5) сума доходу склала 2016,7 тис. у. о., витрати 846,5 тис. у. о. та прибуток 1170,1 тис. у. о.;

– зменшенні доступного обсягу людино-годин робітників при достатньому обсягу льотних годин (табл. 6) – сума доходу склала 1820,3 тис. у. о., витрати 612,7 тис. у. о. та прибуток 1207,6 тис. у. о.;

– зменшенні ресурсу часу використання тракторів, комбайнів та машин (табл. 7) – сума доходу склала 1688,2 тис. у. о., витрати 557,8 тис. у. о. та прибуток 1130,4 тис. у. о.

Визначено, що No-till технологія є найменш ресурсовитратною в плані використання наземних транспортних засобів.

Такі висновки можуть вважатися за доцільні з практичної точки зору, тому що дозволяють обґрунтовано підходити до раціонального використання транспортно-виробничих ресурсів та приймати своєчасні обґрунтовані управлінські рішення з метою отримання максимального прибутку. Однак неможливо не відмітити, що застосування авіаційного транспорту має високу собівартість виконання робіт, тому необхідно шукати шляхи зменшення цих витрат.

Для подальшого вдосконалення розробленої математичної моделі необхідно врахувати застосування системи No-Till диференційовано в залежності від ґрунтово-кліматичних умов регіону, наявності відповідних можливостей господарства та матеріально-технічної бази.

Розвитком подальшого дослідження можливе врахування ризиків, управління якими включає вибір між альтернативами, які мають невизначені результати. Найбільш розповсюджені джерела ризиків у рослинництві наступні:

– недостатня кількість опадів або засуха можуть спричинити низьку врожайність сільськогосподарських культур;

– град або проливні дощі можуть пошкодити або знищити врожай;

– виробничим ризиком є несправність технічного обладнання під час виробничого сезону, що призводить до неможливості вчасного зібрання врожаю.

7. Висновки

1. На основі проведеного дослідження розроблено структурну схему транспортного забезпечення аграрних робіт при вирощуванні сільськогосподарських культур з розподілом наземних та авіаційних транспортних засобів в залежності від виду цих робіт. Такий розподіл забезпечить раціональне застосування цих видів транспорту з урахуванням техніко-економічних особливостей.

2. Розроблена математична модель для забезпечення оптимального використання транспортно-виробничого комплексу дозволяє у процесі організації і ведення сільськогосподарського виробництва приймати своєчасні обґрунтовані управлінські рішення з метою отримання максимального прибутку.

3. На основі використання розробленої математичної моделі проведені дослідження можливого розв'язку різних задач за різних значень фіксованих та змінних параметрів, що дало можливість дослідити, як впливають зміни цих параметрів на оптимальний розв'язок та величину прибутку. Визначено «базовий» варіант, який складався з повного забезпечення ресурсами для всіх куль-

тур при використанні No-till технології на всіх (100 %) запланованих площах, та досягнуто планову врожайність, яка є максимальною в даній моделі. За цим варіантом сума доходу склала 1977,0 тис. у. о., витрати 620,0 тис. у. о. та прибуток 1357,0 тис. у. о. Отримані результати порівнювалися з результатами розрахунків при інших співвідношеннях обсягів ресурсів. Результати порівняння вказують на те, що No-till технології є найменш ресурсовитратними щодо використання наземних транспортних засобів.

Література

1. Пронь, С. В. (2016). Основи формування інтегрованої транспортної системи вирощування зернових культур. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 96, 192–199.
2. Vasylovskaya, K. V., Leshchenko, S. M., Vasylovskiy, O. M., Petrenko, D. I. (2016). Improvement of equipment for basic tillage and sowing as initial stage of harvest forecasting. INMATEH, 50 (3), 13–20.
3. Popovych, P. V., Lyashuk, O. L., Murovanyi, I. S., Dzyura, V. O., Shevchuk, O. S., Myndyuk, V. D. (2016). The service life evaluation of fertilizer spreaders undercarriages. INMATEH, 50 (3), 39–46.
4. Mostypan, M. I., Vasylovskaya, K. V., Andriyenko, O. O., Reznichenko, V. P. (2017). Modern aspects of tilled crops productivity forecasting. INMATEH, 53 (3), 35–40.
5. Vasylovskaya, K. V., Vasylovskiy, O. M., Sviren, M. O., Petrenko, D. I. et. al. (2019). Determining the parameters of the device for inertial removal of excess seed. INMATEH, 57 (1), 135–140. doi: https://doi.org/10.35633/inmateh_57_14
6. Кривуца, З. Ф. (2010). Использование математических моделей для оптимизации работы автомобильного транспорта. Механизация и электрификация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве, 17, 136.
7. Шаріфов, Ф. А., Юн, Г. М., Кандиба, Г. Ю. (2014). Оптимізація маршрутів повітряних суден, що виконують агроавіаційні роботи. Наукоємні технології, 23 (3), 319–325. doi: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.23.7415>
8. Marintseva, K., Yun, G., Kachur, S. (2015). Resource allocation improvement in the tasks of airport ground handling operations. Aviation, 19 (1), 7–13. doi: <https://doi.org/10.3846/16487788.2015.1015291>
9. Соловйова, О. О., Герасименко, І. М., Ровненко, М. М. (2011). Економічна ефективність використання авіації в сільському господарстві в порівнянні з наземною технікою. Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки, 1 (171), 194–198.
10. Еналеева-Бандура, И. М., Данилов, А. Г., Никончук, А. В., Давыдова, А. Л. (2017). Динамическая модель транспортно-технологического процесса доставки лесного сырья в многопродуктовой постановке. Хвойные бореальной зоны, 1-2, 84–87.
11. Пронь, С. В., Висоцька, І. І. (2016). Теоретичні аспекти поняття транспортної системи аграрних робіт. Молодий вчений, 4, 252–256.

12. Махмуд ель Асскар, Бикова, О. Є. (2009). Вплив технології No-till у зонах недостатнього зволоження на властивості ґрунтів і продуктивність культур. Вісник аграрної науки, 2, 25–28.
13. Гужвенко, С. М. (2016). Особливості планування під час використання інноваційних систем технологій у виробничій діяльності аграрного підприємства. Економіка і суспільство, 7, 260–265. URL: http://economyand-society.in.ua/journal/7_ukr/44.pdf
14. Підсумки діяльності авіаційної галузі України. URL: <http://avia.gov.ua/>
15. Статистичні дані в галузі авіатранспорту. URL: <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-v-galuzi-aviatransportu.html>
16. Hess, L. J. T., Hinckley, E.-L. S., Robertson, G. P., Matson, P. A. (2020). Rainfall intensification increases nitrate leaching from tilled but not no-till cropping systems in the U.S. Midwest. Agriculture, Ecosystems & Environment, 290, 106747. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106747>
17. Wang, J., Zou, J. (2020). No-till increases soil denitrification via its positive effects on the activity and abundance of the denitrifying community. Soil Biology and Biochemistry, 142, 107706. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107706>
18. Ferreira, C. dos R., Silva Neto, E. C. da, Pereira, M. G., Guedes, J. do N., Rosset, J. S., Anjos, L. H. C. dos. (2020). Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. Soil and Tillage Research, 198, 104533. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104533>
19. Пронь, С. В., Висоцька, І. І., Соловйова, О. О. (2017). Моделювання виконання аграрних робіт з урахуванням транспортної складової. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, 100, 331–340.
20. Сайт корпорації «Агро-Союз». URL: <http://www.agrosoyuz.ua/products/tech-conf-educ/plant-growing>
21. American Optimal Decisions. URL: <http://www.aorda.com>